

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Analýza ztrát v sítích 110 kV
Analysis of Losses in 110 kV Networks

2010

Miroslav Sojka

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. května 2010

.....
Miroslav Sojka

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Stanislavu Ruskovi a panu Ing. Františku Střídovi za cenné rady, které mi poskytli během vypracování mé práce.

Anotace:

Tato práce se zabývá analýzou ztrát na vedení 110kV v přenosové soustavě ČR v nejmenované severozápadní oblasti. Popisuje metody pro výpočet a určení ztrát obecně. V praktické části je provedena simulace a vyhodnocení na konkrétní síti 110kV. Zahrnuje závislosti ztrát transformátorů a vedení v modelované soustavě na měnících se parametrech soustavy. K analýze byla použita simulace na modelu v programu Pas Causy Bizon Projektant.

Klíčová slova:

Elektrizační soustava, elektrické ztráty, doba plných ztrát, doba využití maxima, teoretický rozbor ztrát, metody výpočtů ztrát, metody snižování ztrát, vyhodnocení ztrát.

Abstract:

This work analyzes the loss of leadership 110kV in the transmission system in the CR in an unnamed northwest area. It describes methods for calculating and determining the losses in general. In the practical part is a simulation and evaluation on the specific 110kV network. It includes losses depending transformers and lines in the model system on changing the parameters of the system. For the analysis was used the simulation model in the program Pas Daisy Bizon Projektant.

Key words

Electricity system, electric losses, time full losses, time maximum recovery, theoretical analysis of losses, method of calculating losses, methods for reducing losses, optimization loss.

Seznam zkratk a symbolů

A	ampér	ΔP	činné ztráty výkonu [W]
C	kapacita [F]	ΔP_0	ztráty naprázdno [W]
$\cos\varphi$	účinník	ΔP_{diel}	dielektrické ztráty výkonu [W]
ČR	Česká republika	ΔP_k	ztráty nakrátko [W]
f	kmitočet [Hz]	ΔP_{svod}	svodové ztráty výkonu [W]
G	svodová vodivost [S]	ΔQ	jalové ztráty výkonu [var]
H	Henry	ΔU	úbytek napětí [V]
Hz	Hertz	ΔW_Z	ztráty elektrické energie [MW.h]
I	Elektrický proud [A]	γ	konstanta přenosu [km ⁻¹]
I_{max}	maximální proudové zatížení [A]	φ	fázový posuv mezi napětím a proudem
I_{nab}	nabíjecí proud [A]	π	Ludolfovo číslo
kV	kilovolt	α	délka vlny [m]
kW	kilowatt	Ω	Ohm
L	indukčnost [H]	Z_v	vlnová impedance [Ω]
ln	přirozený logaritmus	zvn	zvlášť vysoké napětí
MVA	megavoltampér		
MW	megawatt		
M_i	proudový moment [A·m]		
obr.	Obrázek		
P	činný výkon [W]		
S	zdánlivý výkon [VA]		
S_p	přirozený výkon [VA]		
tab.	tabulka		
T	doba chodu [h]		
t_u	doba využití maximálního zatížení [h]		
t_z	doba plných ztrát [h]		
U_1	vstupní napětí [V]		
U_2	výstupní napětí [V]		
U_n	jmenovité napětí (sdružené) [V]		
U_s	sdružená hodnota napětí [V]		
U_f	fázová hodnota napětí [V]		
V	Volt		
vn	vysoké napětí		
vvn	velmi vysoké napětí		
W	Watt		
W_D	energie dodaná [MW.h]		
W_O	energie odebraná [MW.h]		
Y	admitance [S]		
Z	impedance [Ω]		

Obsah

Úvod.....	8
1 Základní pojmy:	9
1.1 Rozdělení napětových hladin pro střídavou síť:.....	10
1.2 Dělení elektrických sítí:	11
1.3 Parametry vedení	11
2 Teoretický rozbor ztrát.....	12
2.1 Technické ztráty.....	12
2.2 Ztráty na vedení(Jouleovy):	13
2.2.1 Odvození vztahu pro výpočet ztrát:.....	13
2.2.2 Jednoduché vedení rovnoměrně zatížené	14
2.2.3 Vedení zatížené na konci	15
2.2.4 Vedení napájené ze dvou stran	15
2.3 Ztráty transformátoru	17
2.3.1 Činné ztráty transformátoru.....	17
2.3.2 Jalové ztráty transformátoru	18
2.4 Koróna	18
2.5 Ztráty svodem	19
2.6 Dielektrické ztráty.....	19
2.7 Zjišťování ztrát.....	20
2.8 Možnosti optimalizace ztrát	20
3 Ztráty v sítích 110 kV	21
3.1 Metody výpočtu sítí	21
3.1.1 Náhrada vedení s rovnoměrně rozloženými parametry pro výpočet dvojbranem se soustředěnými parametry	22
3.1.2 Náhrada vedení rovnoměrně rozloženými parametry.....	23
3.1.3 Ztráty činného výkonu	24
3.2 Přenos přirozeným výkonem	25
4 Rozbor vlivu ovlivňující elektrické ztráty	26
4.1 Změna jalového výkonu.....	27
4.2 Řízení napětí transformátorů.....	28
5 Rozbor ztrát v konkrétní napájecí oblasti.....	29
5.1 Popis modelované oblasti 110kV.....	29
5.2 Schéma modelované oblasti.....	29
5.3 Postup určení ztrát elektrické energie:	30
5.4 Možnosti optimalizace ztrát	30
5.4.1 Hlavním cílem regulace U a Q je:	30
5.4.2 Provozní kritéria pro Q a U	31
6 Vyhodnocení optimalizací.....	32
6.1 Modelované varianty modelu.....	32
6.1.1 Přepínání odboček transformátoru.....	32
6.1.2 Simulace změny jalového toku buzením generátoru	38

Závěr.....	43
Seznam použité literatury.....	44
Příloha	45

Úvod

Cílem této bakalářské práce je seznámit se pojmem ztráty. Jejich vlastnostmi a působením na elektrizační síť.

Elektrická energie umožňuje všestranné využití a je beze sporu nejrozšířenější formou energie využívané jak k běžnému životu lidí, tak v nejrůznějších oblastech výroby. K přednostem, ke kterým patří výroba z různých primárních energetických zdrojů, možnost dopravy na velké vzdálenosti, jednoduchá zpětná transformace na jiné druhy energií jsou spojeny i nevýhody, ke kterým patří především nutnost okamžitého využití vyrobené elektrické energie. Tedy musí být zajištěna rovnováha mezi její okamžitou výrobou a spotřebou.

Z tohoto hlediska je zapotřebí vyrobenou elektrickou energii co nejúčelněji využít a přitom minimalizovat veškeré ztráty. Pro přenos v elektrizační soustavě se klade důraz na hospodárnost provozu, tedy aby soustava (zařízení) byla provozována s co nejnižšími ztrátami a s optimálními investičními náklady. Pro přesné vyhodnocení je důležitá znalost technických parametrů a metod používaných k jejich určení.

Ztráty jsou důležitým ukazatelem pro hospodárnost provozu elektrizační soustavy, s nimž musíme uvažovat od místa výroby až ke spotřebitelům. Účelem stanovování a vyhodnocování technických ztrát při přenosu, distribuci a rozvodu elektřiny je vytvořit soubor údajů o celkové výši jednotlivých druhů stálých i proměnných ztrát, určených na základě fyzikálních zákonů.

Pro přenos na větší vzdálenosti je výhodnější a hospodárnější použít vyšší napětí, kdy pro přenesení stejného výkonu stačí úměrně menší proud. Poněvadž je ztrátový výkon přímo úměrný kvadrátu proudu a úbytku napětí, smažeme pomocí zvyšovacích transformátorů snížit proud a úměrně přenášenému výkonu zvýšit napětí. Na výstupu elektrizační soustavy jsou pak transformátory snižovací, které přenášejí potřebný výkon do sítě distribuční. S přenosem jsou kromě činných ztrát úzce spjaty ztráty jalové, které se snažíme eliminovat vhodnými způsoby a zařízeními. Ztráty představují část vyrobené elektrické energie, která je nevyužita a způsobuje dodatečné náklady. Vzhledem k tomu, že celkové ztráty jsou v principu neměřitelné a jejich výše je zatím dána rozdílem energie na vstupu do soustavy a energie obchodně realizované, je proces hodnocení obou druhů ztrát nezbytný.

1 Základní pojmy:

Elektrizační soustava – je soustava sloužící k přenosu a rozvodu elektrické energie z místa výroby až do místa spotřeby.

To zahrnuje:

- Výrobní zařízení – elektrárny všeho druhu
- Přenosová a rozvodná zařízení – vedení, stanice (rozvodny), transformační stanice
- Spotřebiče – zařízení pro přeměnu elektrické energie na teplo, mechanickou práci, světlo, apod.
- Řídící, správní a zabezpečující zařízení.

Přenosová soustava – tvoří tzv. páteřní síť, slouží k přenosu velkých výkonů mezi hlavními uzly elektrizační soustavy.

Rozvodná (distribuční) soustava – zajišťuje dodávku elektrické energie z napájeného uzlu do jednotlivých skupin nebo oblastí spotřebičů.

Elektrická síť – jsou seskupení přenosových a rozvodných zařízení stejného napětí, jenž obsahuje vedení spojená v uzlech nebo stanicích.

Stanice je část sítě umožňující připojení a odpojení vedení (spínací vedení), nebo zajišťuje spojení sítí různých napěťových hladin (transformační stanice), případně měnit druh proudu (měnič).

Ztráty elektrické energie : nazýváme ztráty elektrické energie ve vedení, stanicích, snížovacích a zvyšovacích transformátorech až k elektroměru spotřebitele, včetně vlastní spotřeby ve stanicích [2].

V přenosu a rozvodu elektrické energie si ztráty můžeme představit jako rozdíl mezi energií (výkonem) dodanou na vstupní straně zařízení a energií odebranou na výstupní straně zařízení.

$$\Delta W_z = W_D - W_O \quad [\text{MW} \cdot \text{h}]$$

kde ΔW_z – ztráty elektrické energie v sítích

W_D – energie dodaná

W_O – energie odebraná

Doba plných ztrát – je doba provozu s maximálním výkonem P_{\max} , za kterou se dosáhne stejných ztrát elektrické práce jako ve sledovaném období T při výkonu $P(t)$. Je nutné udat sledované období.

Předpokládá se konstantní napětí a účinník.[2]

$$\Delta W_z \sim \int_0^T I^2(t) \cdot dt = I_{\max}^2 \cdot t_z$$

kde $I(t)$ je efektivní hodnota časově proměnného proudu
 I_{\max} je efektivní hodnota maximálního proudu

$$\Delta W_z \sim \int_0^T P^2(t) \cdot dt = P_{\max}^2 \cdot t_z \Rightarrow t_z = \int_0^T \frac{P^2(t) \cdot dt}{P_{\max}^2}$$

Poměrná doba plných ztrát k_z je definovaná vztahem

$$k_z = \frac{t_z}{T}$$

Důležitý je i vztah mezi dobou využití maximálního zatížení t_u a dobou plných ztrát t_z .

t_u je poměr sledované práce za sledované období k maximálnímu výkonu. Je nutné dat sledované období

$$t_u = \int_0^T \frac{P(t)}{P_{\max}} \cdot dt \quad t_z = \int_0^T \left(\frac{P(t)}{P_{\max}} \right)^2 \cdot dt$$

Poněvadž platí $0 \leq P(t) \leq P_{\max}$, je $P(t) / P_{\max} \geq (P(t) / P_{\max})^2$, pak ale $t_u \geq t_z$

K rovnosti by došlo když:

$$P(t) = P_{\max} = \text{konst.} \Rightarrow t_u = t_z = T \text{ což by odpovídalo konstantní hodnotě výkonu po celé období.}$$

Vylučujeme případ $t_u = 0$, $P(t) = 0$, po celé období[2].

1.1 Rozdělení napěťových hladin pro střídavou síť:

Nízké napětí (NN) – je střídavé napětí od 0,05 kV do 1 kV

Vysoké napětí (VN) - je střídavé napětí od 1 kV do 52 kV

Velmi vysoké napětí (VVN) - je střídavé napětí od 52 kV do 300 kV

Zvláště vysoké napětí (ZVN) - je střídavé napětí od 300 kV do 800 kV

Ultra vysoké napětí (UVN) - střídavé napětí nad 800 kV

Pro přenos a rozvod se používá jmenovitých natětí

$$U_N \text{ (kV)} = 6, 10, 25, 35, 110, 220, 400, 750$$

Každé této hodnotě jmenovitého napětí U_N odpovídá hodnota nejvyššího napětí sítě U_m

$$U_m \text{ (kV)} = 7,2; 12; 25; 38,5; 123; 245; 420; 787$$

Pozn. Vyšší hodnota napětí než je nejvyšší napětí sítě je označováno jako přepětí [5].

1.2 Dělení elektrických sítí:

Z hlediska parametrů:

S prostorově soustředěnými parametry – jsou tzv. vedení krátká, pro které uvažujeme u stejnosměrných sítí s činným odporem R a u střídavých sítí s kromě činného odporu R i indukčnost L . (popř.kapacitu C) S těmito parametry se počítá u sítí NN a VN.

S prostorově rozloženými parametry – jsou tzv. vedení dlouhá,sítě u kterých musíme respektovat činný odpor R , indukčnost L , kapacitu C , i svodový odpor G . Platí pro vedení VVN a ZVN. [4]

Z hlediska hladiny napětí:

Přenosové sítě – 400 kV, 220 kV, a částečně 110 kV

Distribuční sítě – 110 kV, 35 kV, 22kV, 10 kV, 6 kV, 0,4 kV

Z hlediska topologie

- paprsková – vzniknou z několika vedení napájených z jedné strany
- okružní – zajišťují větší jistotu dodávky elektrické energie
- mřížové – jsou napájeny paralelně spolupracujícími transformátory,používají se v místech s velkým odběrem energie

1.3 Parametry vedení

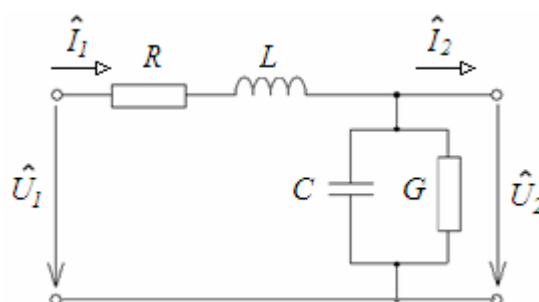
Činný odpor vedení R [Ω]

Indukčnost vedení L [H]

Kapacita vedení C [F]

Svod G [S]

Náhradní schéma 1f vedení:



Obr.1. 1 Jednofázový model vedení

Podélnou impedanci \underline{Z} vedení tvoří činný odpor R (reálná část) a indukčnost L (imaginární část $X_L = \omega L$), která je vyjádřena vztahem:

$$\underline{Z} = R + j\omega L \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

Kapacita C a svodová vodivost G tvoří příčnou admitanci vedení \underline{Y} , která je vyjádřena vztahem:

$$\underline{Y} = G + j\omega C \quad [S] \quad (1.2)$$

kde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ úhlová rychlost [s^{-1}]

2 Teoretický rozbor ztrát

Ztráty elektrické energie lze je rozdělit na ztráty technické, které vznikají provozem zařízení v důsledku platnosti fyzikálních zákonů, a ztráty netechnické, které souvisejí s výkonem řídicí, kontrolní a obchodní činnosti.

Ztráty technické jsou jednak stálé, nezávislé na množství přenesené elektřiny, ale na technických parametrech zařízení, a jednak proměnné, mající přímou souvislost s velikostí přenášeného výkonu.

Netechnické ztráty tvoří ztráty související přímo s činnostmi na zařízení a dále ztráty v oblasti obchodní nebo kontrolní. Mezi netechnické ztráty lze zařadit nepřesnost měření, vada měření, vadná zapojení měření, chybné odečty, nesprávné konstanty měření, odběry pod hranicí citlivosti měření, dále paušální odběry (pokud jsou v neprospěch dodavatele elektřiny), nesoudobost odečtů a především neoprávněné odběry [10]. Tyto ztráty dále nebudou rozebírány.

2.1 Technické ztráty

Technické ztráty jsou skutečné ztráty v rozvodu el. energie, bez užítu pro celou společnost.

Dělí se na ztráty naprázdno (např. transformátory v chodu bez zatížení, svod, koróna) a na ztráty závislé na zatížení.

Rozdělení ztrát:

- Ztráty transportem el. energie po vedení
- Ztráty transformací el. energie v transformátorech

Technické ztráty se dají podrobněji rozdělit na ztráty stálé a proměnné.

Ztráty stálé:

- Ztráty korónou
- Ztráty svodem
- Ztráty dielektrika
- Ztráty transformátoru naprázdno

Ztráty proměnné:

- Ztráty na vedení(joulový)
- Ztráty transformátoru nakrátko

2.2 Ztráty na vedení(Jouleovy):**2.2.1 Odvození vztahu pro výpočet ztrát:**

Pro následující výpočty je uveden vztah pro výpočet úbytku napětí ΔU_f .

Pro velikost úbytku napětí platí:

$$\Delta \underline{U}_f = (R + jX) \cdot (I \cos \varphi - jI \sin \varphi) = (R + jX) \cdot (I_c - jI_j) = (RI_c + XI_j) + j(XI_c - RI_j) \quad (2.1)$$

Pro většinu výpočtu se jalová složka $j(XI_c - RI_j)$ zanedbává. Odvození je pro vedení induktivního charakteru. V případě kapacitní zátěže je mezi složkami proudu znaménko opačné $(I_c + jI_j)$.

$$\Delta U_f = R \cdot I_c + X \cdot I_j = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot I_c + X_k \cdot l \cdot I_j \quad (2.2)$$

$$\Delta U_f = \frac{\rho}{S} \cdot M_{ci} + X_k \cdot M_{ji} \Rightarrow \Delta U_s = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho}{S} \cdot M_{ci} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot M_{ji}$$

Je-li od výrobce udána velikost rezistence na 1 km:

$$\Delta U_f = R_k \cdot M_{ci} + X_k \cdot M_{ji} \Rightarrow \Delta U_s = \sqrt{3} \cdot R_k \cdot M_{ci} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot M_{ji} \quad (2.3)$$

$M_i = \sum_{i=1}^n (l_i \cdot I_i)$ je proudový moment, složený ze složky činné M_{ci} a jalové M_{ji} .

(2.4)

Výkonové ztráty je možno obecně vyjádřit pro střídavé trojfázové sítě následovně:

Ztrátový zdánlivý výkon

$$\Delta \underline{S} = 3 \cdot \Delta \underline{U}_f \cdot \underline{I}^* = 3 \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I} \cdot \underline{I}^* = 3 \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}^2 = 3 \cdot (R + jX) \cdot I^2 \quad (2.5)$$

Dosazením (2.1) za $\Delta \underline{U}_f$ dostaneme:

$$\Delta \underline{S} = 3RI^2 + 3jXI^2 = \Delta P + \Delta jQ \quad (2.6)$$

Kde ΔjQ jsou ztráty způsobeny jalovou složkou

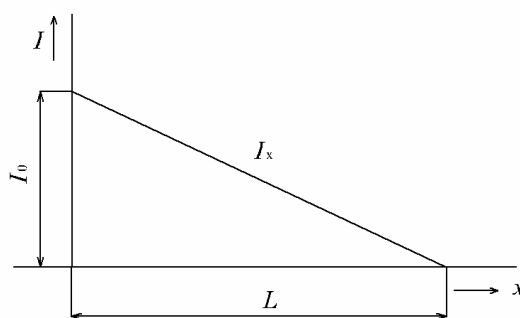
Pro činné ztráty ΔP trojfázové sítě platí:

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R \cdot (I_e^2 + I_j^2) \quad (2.7)$$

Jak vyplývá ze vztahu (2.7) způsobuje činné ztráty i jalová složka proudu, i když nekoná činnou práci. [4]

2.2.2 Jednoduché vedení rovnoměrně zatížené

Uvažujeme vedení, jehož odběry jsou ve stejných malých vzdálenostech od sebe. U takového vedení lze předpokládat spojitou změnu proudu ve vedení způsobenou měrnou hodnotou odběrů. Proud se mění se vzdáleností x od zdroje lineárně [1].



Obr.2.1 Vedení rovnoměrně zatížené

Jsou-li ztráty výkonu na elementárním úseky vedení

$$d(\Delta P) = \frac{3\rho}{S} \cdot I_x^2 \cdot dx = \frac{3\rho}{S} [i_k(L-x)]^2 dx \quad (2.8)$$

$$\underline{I}_x = \underline{i}_k(L-x) = \underline{i}_{kc}(L-x) - j\underline{i}_{kj}(L-x)$$

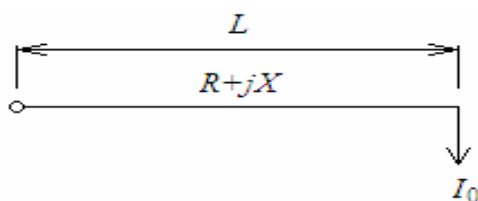
Pak celkové činné ztráty výkonu dané součtem ztrát v elementárních úsecích vyjádříme

$$\Delta P = \frac{3\rho}{S} \cdot i_k^2 \cdot \int_0^L (L^2 - 2Lx + x^2) \cdot dx = \frac{3\rho}{S} \cdot i_k^2 \left[L^2 x - Lx^2 + \frac{x^3}{3} \right]_0^L$$

$$\Delta P = \frac{3\rho}{S} \cdot i_k^2 \cdot L^2 \cdot \frac{L}{3} = \frac{3\rho}{S} \cdot I_0^2 \cdot \frac{L}{3} \quad (2.9)$$

Z uvedeného vztahu (2.19) vyplývá, že ztráty výkonu na rovnoměrně zatíženém vedení jsou třetinou ztrát vznikajících u stejného vedení zatíženého na konci jedním odběrem I_0 [1].

2.2.3 Vedení zatížené na konci



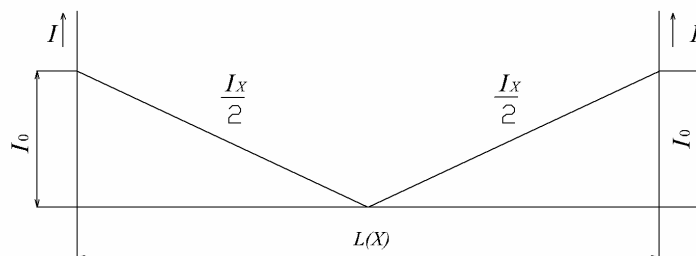
Obr.2.2 Vedení zatížené na konci

Pro činné ztráty platí jednoduchý vztah:

$$\Delta P = \frac{3\rho}{S} \cdot I_0^2 \cdot L \quad (2.10)$$

$$\underline{I}_x = \underline{I}_0 = \underline{i}_k(L) = \underline{i}_{k\check{c}}(L) - j\underline{i}_{kj}(L)$$

2.2.4 Vedení napájené ze dvou stran



Obr.2.3 Vedení napájené ze dvou stran

$$d(\Delta P) = \frac{3\rho}{S} \cdot I_x^2 \cdot dx = \frac{3\rho}{S} \left[2 \cdot i_k \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) \right]^2 dx \quad (2.11)$$

$$I_x = 2 \cdot i_k \left(\frac{L}{2} - x \right) = 2 \cdot i_{k\epsilon} \left(\frac{L}{2} - x \right) - 2 \cdot j_{kj} \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad (2.12)$$

$$\Delta P = \frac{6\rho}{S} \cdot i_k^2 \int_0^{L/2} \left(\frac{L^2}{4} - Lx + x^2 \right) dx = \frac{6\rho}{S} \cdot i_k^2 \left[\frac{L^2}{4} x - \frac{L}{2} x^2 + \frac{x^3}{3} \right]_0^{L/2} \quad (2.13)$$

$$\Delta P = \frac{\rho}{S} \cdot i_k^2 \cdot L^2 \cdot \frac{L}{4} = \frac{\rho}{S} \cdot I_0^2 \cdot \frac{L}{4}$$

Napájením vedení ze dvou stran se sníží ztráty na čtvrtinu jak vyplývá z této úvahy.

Dostává se nám výhody použití zauzlených sítí (např. mřížová síť).

Obecně platí:

U vedení pro distribuční přenos se obvykle počítají ztráty jen s činným odporem, které způsobuje oteplení vodiče, a zanedbávají se ostatní parametry.

$$\Delta P = k \cdot R \cdot I^2 \quad [W; \Omega; A] \quad (2.14)$$

Kde: ΔP - činné ztráty na vedení

R - činný odpor na vedení

I - činný proud protékající vedením

k - činitel zatížení, určuje kolikrát jsou ztráty vyšší než u vedení zatíženého rovnoměrnými odběry.

$$k = \frac{3 \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot I_n^2}{R \cdot I^2} \quad (2.15)$$

V případě je-li celý odběr soustředěn do jednoho vývodu na konci vedení je činitel zatížení k roven 3. Z toho je zřejmé, že proud tekoucí celou délkou vedení bude stejný.

Naopak jsou-li odběry rovnoměrně rozloženy po celé délce vedení bude k rovno 1 (např. veřejné osvětlení). Proud bude lineárně klesat.

Z těchto dvou příkladů vyplývá, že činitel zatížení k je závislý na tom, jakým způsobem budou odběry podél vedení rozloženy.

2.3 Ztráty transformátoru

Transformátory mají nezastupitelnou úlohu v přenosu el.energie a jsou to nejvíce zastoupené stroje v přenosu a rozvodu elektrické energie.

Pro svou činnost transformátor spotřebovává dvě složky energie: musíme uvažovat činné a jalové ztráty. Dále rozlišujeme ztráty nakrátko a naprázdno.

2.3.1 Činné ztráty transformátoru

Rozděluje na ztráty:

- Stálé – naprázdno (v železe) ΔP_0 nebo ΔP_{Fe}
- Proměnné – nakrátko (ve vinutí) ΔP_K

Činné ztráty nakrátko jsou závislé na zatížení a jejich hodnota se určuje atestací transformátoru. Stejně se určují i ztráty naprázdno jenž jsou ztráty stálé[4].

Vztah pro činné ztráty :

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \Delta P_K \quad [\text{kW}; \text{kW}; \text{VA}; \text{kW}] \quad (2.16)$$

Kde ΔP_T celkové činné ztráty
 ΔP_0 činné ztráty naprázdno
 ΔP_K činné ztráty nakrátko
 Sjmenovitý výkon transformátoru
 S_Nskutečné zatížení transformátoru

Ztráty energie

$$\Delta W = \Delta P_{Fe} \cdot T + \Delta P_K \cdot \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \Delta T$$

Kde T je doba chodu, většinou se udává za rok
 ΔT je doba plných ztrát

2.3.2 Jalové ztráty transformátoru

Jalové ztráty nakrátko jsou závislé na zatížení a proudu nakrátko a jalové ztráty naprázdno závisí na proudu naprázdno procházejícím transformátorem[4].

$$\Delta Q_T = \frac{i_0}{100} \cdot S_N + \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \frac{u_K}{100} \cdot S_N \quad [\text{kvar; \%; VA; \%VA}]$$

Kde ΔQ_T ...jalové ztráty transformátoru
 i_0 ...proud naprázdno transformátoru
 u_K ...napětí na krátko transformátoru
 S_N ...jmenovité zatížení transformátoru
 S ...skutečné zatížení transformátoru

2.4 Koróna

Je modrofialový tichý výboj, který vzniká na povrchu vodičů a armatur vedení (svorek, izolátorech), při překročení určité velikosti elektrického pole tzv. kritického napětí. Což má za následek prosakování proudu do prostoru mezi vodiče venkovního vedení. Je tedy příčinou ztrát elektrické energie. Mezní hodnota, kdy koróna vzniká je závislá na vzdálenosti vodičů, atmosférických podmínkách a kvalitě povrchu vodičů.

Elektrické namáhání na povrchu vodičů se sníží použitím svazkových vodičů, zvětší se hodnota počátečního napětí koróny[1].

Ztráty korónou:

$$P = k \cdot (U_f - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{W/m; kV}] \quad (2.17)$$

$$k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \quad [-; \text{Hz; m;m}] \quad (2.18)$$

Hodnota 25 přičtená ke frekvenci f definuje ztráty v případě stejnosměrné koróny[5].

Kde U_f je fázová hodnota vvn napětí
 U_0 počáteční napětí koróny na vedení
 δ je relativní hustota vzduchu

Pro třífázové ve počítá napětí koróny pomocí vztahu:

$$U_0 = 21,1 \cdot \sqrt{3} \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad [\text{kV; cm}] \quad (2.19)$$

Kde d je střední vzdálenost vodičů $d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$ [cm]

m_1 je vliv povrchu vodiče (pro hladký povrch $m_1=1$)

m_2 je koeficient vlivu počasí (pro slunečné počasí $m_2=1$)

U svazkových vodičů se nejdříve vypočítá ekvivalentní poloměr svazku

$$r_e = \rho \cdot \sqrt[n]{n \frac{r}{\rho}} \quad (2.20)$$

Kde ρ poloměr rozmístění vodičů ve svazku

$$\rho = \frac{\text{vzdálenost vodičů ve svazku}}{\sqrt{\text{počet vodičů ve svazku}}}$$

n je počet vodičů ve svazku

r je poloměr vodičů

2.5 Ztráty svodem

Svod způsobuje činné ztráty na vedení, vlivem nedokonalosti izolace protéká vedením svodový proud, který závisí na izolačním odporu izolantu a napětí vůči zemi. Závisí tedy na kvalitě izolátorů, provozních a atmosférických podmínkách. Ztráty svodem se vyjadřují na kilometr vedení.

$$I_{svod} = \frac{U_0}{R_{izol}} \quad [\text{A/km}] \quad (2.21)$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_0^2}{R_{izol}} \quad [\text{kW/km}] \quad (2.22)$$

2.6 Dielektrické ztráty

Představují ztráty svodem, vznikají u kabelových vodičů. Jejich měření se provádí pomocí nabíjecího proudu, který teče do kabelu při stavu naprázdno.

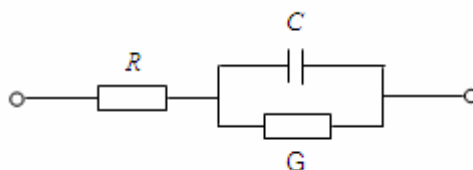
$$I_{nab} = \frac{U_f}{X_c} \Rightarrow I_{nab} = U_f \cdot \omega \cdot C_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k \cdot 10^{-3} \quad [\text{A/km}] \quad (2.23)$$

$$\Delta P_{diel} = U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k \cdot \text{tg} \delta \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/km}] \quad (2.24)$$

kde ω je úhlová rychlost [rad/s]
 δ je ztrátový úhel
 C_k je kapacita kabelu [F/m]
 X_c je kapacitní reaktance kabelu [Ω]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G}{\omega \cdot C}$$

Náhradní schéma obvodu:



Obr.2.4 Náhradní schéma

Odpor R znázorňuje odpor přívodů a vodivost G představuje ztráty v dielektriku. Pro síťovou frekvenci se většinou zanedbává odpor R a pro ostatní veličiny je definován ztrátový úhel δ .

2.7 Zjišťování ztrát

Ztráty můžeme určit buď metodou výpočtu nebo měřením

Způsob výpočtu je probrán v předchozí a následující části této práce. Ztráty měřením zjišťujeme například z odečtu u elektroměrů na vstupu a výstupu pro danou oblast, ale měření je velice složité například kvůli nesoudobosti odečtu u měřících přístrojů.

2.8 Možnosti optimalizace ztrát

S investičními náklady - kompenzace účinníku, přechod na vyšší hladinu napětí, zvětšení průřezů vodičů, vhodné propojení sítě, výměna zařízení se špatnou účinností.

Bez investičních nákladů - regulace napětí, vhodná údržba zařízení, hospodárné zatížení vodičů, zmenšení nesouměrnosti zatížení vodičů, hospodárné zatěžování skupin transformátorů, účelné rozdělení zatížení mezi jednotlivé napájecí body, zmenšení špičkového zatížení[4].

3 Ztráty v sítích 110 kV

Přenos velkého množství elektrické energie na velké vzdálenosti je úkolem trojfázových vedení nejvyšších hladin napětí. U těchto vedení se je třeba se zaměřit a stanovení poměrů na jednom konci přenosu při zadaných poměrech na druhém konci. Tím získáme podklady pro stanovení ztrát činného výkonu[2].

Řešení dlouhých přenosových vedení se provádí při uvažování všech čtyř parametrů (R , L , G , C). Podélnou impedanci vedení mám určuje vztah $\underline{Z} = R \cdot j\omega L$, a pro příčnou admitanci vedení platí $\underline{Y} = G \cdot j\omega C$.

Tyto parametry jsou udávány na jednotku délky vedení(na kilometr)

Vedení 110 kV se řadí do napěťové hladiny vvn a plní v současné době především rozvodné úkoly. Rozvádějí energii od velkých uzlů stanic 400 kV a 200 kV do měst případně napájejí průmyslové závody. Jejich základní schéma jsou závislá především na počtu odboček.

3.1 Metody výpočtu sítí

Elektrické soustavy modelujeme jako vedení s rovnoměrně rozloženými parametry nebo vedení s prostorově soustředěnými parametry. Rozhodnutí, který model bude vhodné použít závisí na frekvenci, rychlosti šíření vln obvodem a na geometrickém rozměru vedení. Budeme-li uvažovat v harmonicky proměnném elektromagnetickém poli rychlost šíření vlny $v = 3 \cdot 10^5 \text{ km.s}^{-1}$, frekvenci $f = 50\text{Hz}$, dostaneme délku vlny[3]:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^5}{50} = 6000\text{km} \quad (3.1)$$

Výpočty sítí s prostorově soustředěnými parametry s přijatelnou přesností provádíme do délky vedení až 500km, pro sítě větší délky musíme uvažovat vedení rovnoměrně rozložené parametry.

3.1.1 Náhrada vedení s rovnoměrně rozloženými parametry pro výpočet dvojbranem se soustředěnými parametry

Touto metodou je možné stanovit poměry ne jednom konci vedení. V praxi se používá náhrada vedení se soustředěnými parametry ve tvaru článků T a Π .

Vedení se řeší pomocí dvojbranu, který je popsán rovnicemi:

$$\underline{U}_{1f} = \underline{A} \cdot \underline{U}_{2f} + \underline{B} \cdot \underline{I}_2 \quad [\text{V}] \quad (3.2)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_{2f} + \underline{D} \cdot \underline{I}_2 \quad [\text{A}] \quad (3.3)$$

Kde \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} jsou tzv. Blondeovy konstanty

Platí: $\underline{A} = \underline{D}$, $\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1$.

3.1.1.1 Náhrada T článkem

Náhrada T článkem se vytvoří tak, že podélná impedance se \underline{Z} rozdělená na dvě poloviny soustředí na začátek a konec vedení. Příčná admitance \underline{Y} se umístí do středu vedení. Pro zjednodušení diagramu zanedbáváme svod.

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_k \cdot \underline{Y}_k \cdot l^2}{2} \quad [-] \quad (3.4)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_k \cdot \underline{Y}_k \cdot l^2}{4} \right) \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

$$\underline{C} = \underline{Y}_k \cdot l \quad [\text{S}] \quad (3.6)$$

3.1.1.2 Náhrada Π článkem

Náhrada Π článkem se vytvoří umístěním podélné impedance \underline{Z} do středu vedení a příčná admitance \underline{Y} rozdělená na poloviny je umístěna na začátek a konec vedení. Pro zjednodušení diagramu zanedbáváme svod.

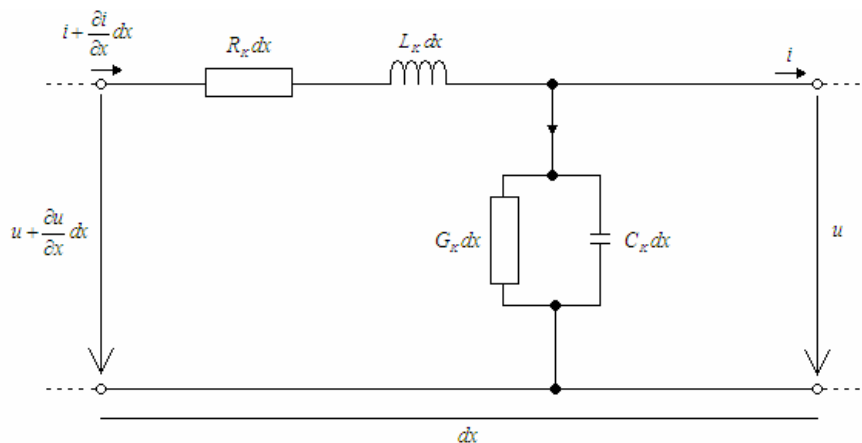
$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_k \cdot \underline{Y}_k \cdot l^2}{2} \quad [-] \quad (3.7)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_k \cdot l \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

$$\underline{C} = \underline{Y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_k \cdot \underline{Y}_k \cdot l^2}{4} \right) \quad [\text{S}] \quad (3.9)$$

3.1.2 Náhrada vedení rovnoměrně rozloženými parametry

Parametry jsou rovnoměrně rozloženy podél celé délky vedení. Takové vedení označujeme jako homogenní vedení. Pro výpočet uvažujeme sinusový průběh.



Obr.3.1 Náhradní schéma vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

Pomocí Kirchhoffových zákonů, získání Thomsonových rovnic (1 a 2), dosazení vztahů pro střídavé napětí a proud a postupnými úpravami (viz. odborná literatura) dostaneme vztah:

$$\underline{U}_x = \underline{U}_{f2} \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot x) + \underline{Z}_V \cdot \underline{I}_2 \sinh(\underline{\gamma} \cdot x) \quad (3.10)$$

$$\underline{I}_x = \frac{\underline{U}_{f2}}{\underline{Z}_V} \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot x) + \underline{I}_2 \cosh(\underline{\gamma} \cdot x) \quad (3.11)$$

Rovnice (3.10) a (3.11) se často píšou ve tvaru:

$$\underline{U}_{1f} = \underline{A} \cdot \underline{U}_{2f} + \underline{B} \cdot \underline{I}_2 \quad [\text{V}]$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_{2f} + \underline{D} \cdot \underline{I}_2 \quad [\text{A}]$$

Platí:

$$\underline{A} = \underline{D} = \cosh(\underline{\gamma} \cdot x) \quad [-]$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_V \sinh(\underline{\gamma} \cdot x) \quad [\Omega]$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_V} \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot x) \quad [\text{S}]$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_k \cdot \underline{Y}_k} = \alpha + j\beta \quad [\text{km}^{-1}; \Omega/\text{km}; \text{S}/\text{km}]$$

Kde α je činitel útlumu [1/km]

β je fázová konstanta [1/km]

Bude-li β rovno nule, jedná se stejnosměrné vedení ($L_k = C_k = 0$). V případě α rovno nule, je vedení tzv. bezztrátové ($R_k = G_k = 0$). Protože u vedení VVN převládají složky induktivní reaktance a kapacitní vodivosti, je možné v mnoha případech vedení nahradit vedením bezztrátovým (fiktivním) [4].

3.1.3 Ztráty činného výkonu

Ze známých a vypočtených hodnot se pak ztráty dají určit jednoduše:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad [\text{kW}] \quad (3.12)$$

3.2 Přenos přirozeným výkonem

Pro porovnání přenosové schopnosti u vedení vvn a zvn se používá přirozený výkon, pokud je vedení zatíženo vlnovou impedancí přenáší tzv. přirozený výkon.

$$\underline{S}_p = 3 \cdot \underline{U}_{f2}^* \cdot \underline{I}_2 = 3 \cdot \underline{U}_{f2}^* \cdot \frac{\underline{U}_{f2}}{\underline{Z}_v} = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_v} \quad [\text{MVA}; \text{kV}; \Omega] \quad (3.13)$$

Kde U_2 je sdružené napětí na konci vedení

\underline{Z}_v je vlnová impedance vedení, charakterizuje přenosovou schopnost vedení.

$$\underline{Z}_v = \sqrt{\frac{\underline{Z}_k}{\underline{Y}_k}} \quad [\Omega; \Omega/\text{km}; \text{S}/\text{km}] \quad (3.14)$$

Činná složka přirozeného výkonu je podstatně vyšší než jeho jalová složka, proto se běžně udává přirozený výkon v [MW].

Tab. 3.1

	Vedení vvn, zvn					
Napětí [kV]	110	220	400	750	1150	1800
Počet vodičů ve svazku	1	1	3	4	8	16
Vlnová impedance [Ω]	390	390	280	270	250	230
Přirozený výkon [MW]	30	120	580	2100	5300	14000

$S_p = S$ napětí na začátku U_1 a konci vedení U_2 jsou stejná

$S_p > S$ napětí $U_1 > U_2$, běžný stav provozovaného vedení, síť je kapacitního charakteru.

$S_p < S$ napětí $U_1 > U_2$, síť je kapacitního charakteru. Při chodu naprázdno náhlým odlehčením zátěže je vedení zatěžováno pouze příčnou admitancí – ferrantiho jev.

4 Rozbor vlivu ovlivňující elektrické ztráty

Ztráty zdánlivého výkonu v trojfázové síti se vypočítají:

$$\Delta \underline{S} = 3 \cdot \Delta \underline{U}_f \cdot \underline{I}^* = 3 \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I} \cdot \underline{I}^* = 3 \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}^2 = 3 \cdot (R + jX) \cdot I^2 \quad (4.1)$$

$$\Delta \underline{U}_f = (R + jX) \cdot (I \cos \varphi - jI \sin \varphi) = (R + jX) \cdot (I_\epsilon - jI_j) = (RI_\epsilon + XI_j) + j(XI_\epsilon - RI_j) \quad (4.2)$$

Dosaďme-li do rovnice (4.1) vztah pro úbytek napětí dostaneme:

$$\Delta \underline{S} = 3RI^2 + 3jXI^2 = \Delta P + \Delta jQ \quad (4.3)$$

Kde:

$$I = \sqrt{I_\epsilon^2 + I_j^2} \text{ je proud ve vedení}$$

$$I_\epsilon = I \cdot \cos \varphi = \frac{P}{3 \cdot U_f} \quad I_j = I \cdot \sin \varphi = \frac{Q}{3 \cdot U_f} \quad (4.4)$$

Ztráty zdánlivého výkonu mají dvě složky:

První složku reálnou, výkon ztracený ohřevem vodičů

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R \cdot (I_\epsilon^2 + I_j^2) \quad (4.5)$$

Druhá je imaginární, ztráty jalového výkonu ve vedení

$$\Delta Q = 3XI^2 = 3X \cdot (I_\epsilon^2 + I_j^2) \quad (4.6)$$

Vyjádříme-li proud pomocí výkonů

$$I = \frac{P}{3 \cdot U_f \cdot \cos \varphi} \quad (4.7)$$

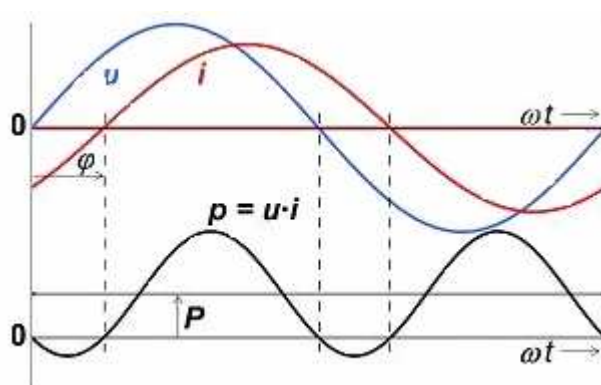
Pak oba ztrátové výkony vzrůstají s druhou mocninou poklesu napětí

$$\Delta P = \frac{R \cdot P^2}{U_f^2 \cdot \cos^2 \varphi} ; \Delta Q = \frac{X \cdot P^2}{U_f^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (4.8)$$

Jak vyplývá ze vztahu (4.5) ovlivňuje činné ztráty i jalová složka proudu, i když nekoná činnou práci. Protože dle smluvních parametrů neměníme dodávku činného výkonu je jednou z cest snížení těchto ztrát vhodný způsob změny jalového výkonu, např. změna jalového výkonu v přenosové soustavě.

4.1 Změna jalového výkonu

Provoz některých elektrických zařízení, ať na straně elektrických sítí nebo na straně spotřebičů elektrické energie, vyžaduje vytvoření elektromagnetického, nebo elektrického pole. Na indukčnosti dochází vlivem průchodu proudu k jeho fázovému posunu za napětím, na kapacitě se fázově opoždí napětí za proudem. Takže chování jednotlivých prvků určuje nejen složka činná, ale i jalová složka. Jalová proto, že energii do vedení vloženou nelze zužítkovat, ale přesto se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem. Při tomto přenosu vznikají na prvcích přenosových a distribučních sítí ztráty, které jsou ve formě tepla vyzařovány do okolí. Proto je velmi účelné se snažit vhodnými způsoby tyto ztráty eliminovat.



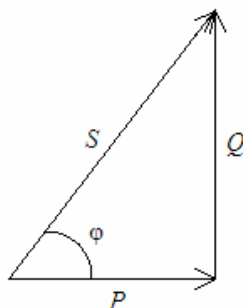
Obr.4.1 Sinusový průběh napětí a proudu

O podílu jalové složky na celkovém zdánlivém výkonu vypovídá účinník, který vyjadřuje podíl činného (je energie, která se skutečně přemění na jiné formy) a zdánlivého výkonu (součin napětí a proudu procházejícího obvodem) v elektrickém obvodu střídavého proudu. Vyjadřuje, jak velkou část zdánlivého výkonu lze přeměnit na užitečnou energii. Účinník závisí na vzájemném fázovém posuvu proudu a napětí. Vypočítá se jako kosinus tohoto posuvu a tak se také značí ($\cos \varphi$) [11].

Účinník je bezrozměrný a jeho hodnota se pohybuje od nuly do jedné, přičemž jednotkový účinník znamená, že celý výkon je činný (fázový posuv je nulový), nulový účinník by znamenal, že celý výkon je jalový. Nízké hodnoty účinníku znamenají vyšší ztráty energie[11].

Zlepšení hodnoty účinníku, tzn. zmenšení jalového výkonu lze provést správným návrhem a provozováním zdrojů přenosové soustavy. V našem případě správné dimenzování transformátorů a využití synchronních generátorů.

Zlepšením účinníku dosáhneme kromě snížení odběru jalové energie také snížení tepelných ztrát v přenosové a rozvodné soustavě, neboť činné ztráty způsobuje i jalová složka.



Obr.4.2 Vazba mezi výkony

4.2 Řízení napětí transformátorů

Výstupní napětí síťových transformátorů musíme řídit proto, bychom vykompenzovali úbytky napětí i při proměnlivém zatížení. Napětí můžeme řídit změnou počtu vstupních nebo výstupních závitů.

Řízení napětí na vstupní straně je výhodnější, neboť při větším počtu závitů je řízení jemnější. Přepínací kontakty mají menší průřez, neboť vedou menší proud. Nevýhodou je změna magnetického toku, která je způsobena změnou počtu závitů. Tím vzniká nestejné zatížení

Zmenšováním počtu vstupních závitů se výstupní napětí zvyšuje.

Při menším počtu vstupních závitů a při nezměněném vstupním napětí podle rovnice $U_1 = 4,44 \cdot \phi \cdot N_1$ je magnetický tok větší, a tím se ve výstupním vinutí indukuje vyšší napětí.

Při zmenšování počtu výstupních závitů se výstupní napětí snižuje[7].

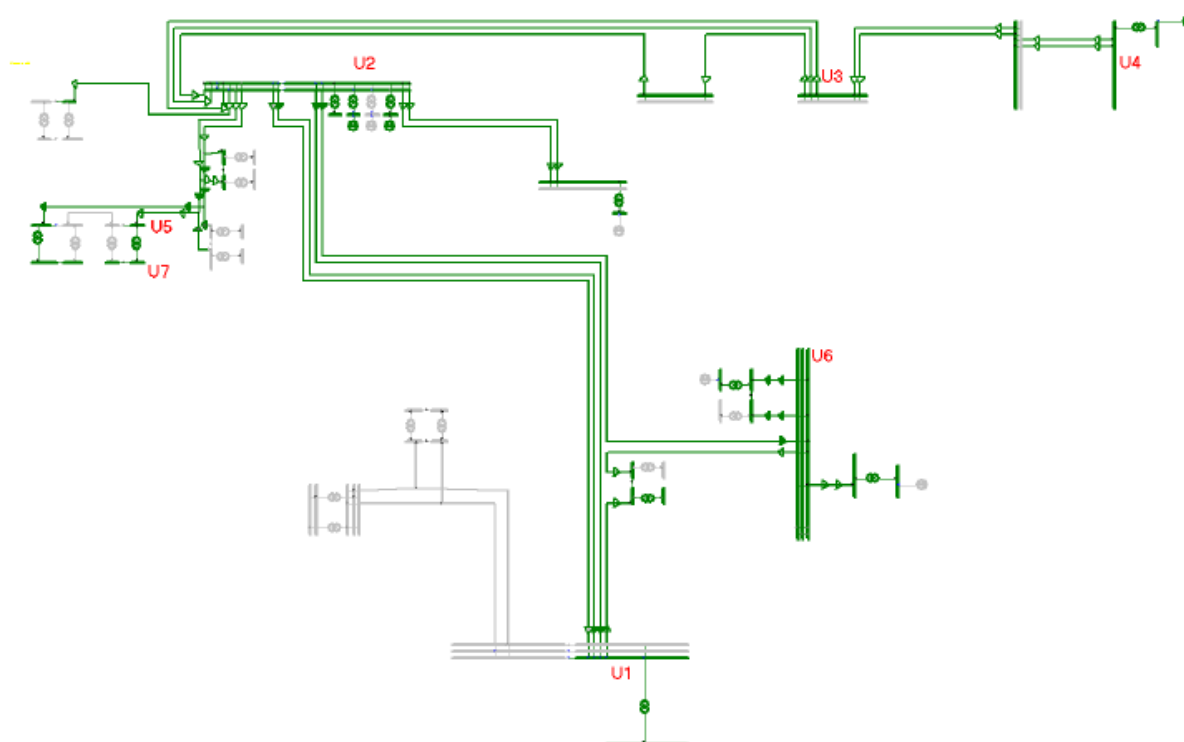
Transformátory větších výkonů mají \pm (8 až 9 napětových stupňů odstupňovaných přibližně po 2% jmenovité hodnoty napětí. Jsou to tzv. říditelné transformátory a musí být možné přepnout jejich odbočky za provozu bez přerušení dodávky proudu.

5 Rozbor ztrát v konkrétní napájecí oblasti

5.1 Popis modelované oblasti 110kV

Model napájecí sítě 110kV je vytvořen od napájecí rozvodny U1 220/110kV do napájecí rozvodny 110/22kV. Zatížení oblasti bylo modelováno dle zimního měření z roku 2009(17hod.). Model respektuje přesné zapojení včetně průřezů a délek vedení. Tam kde byla k dispozici technická data transformátoru (110/22kV, 110/10kV) byly odběry modelovány na hladině VN (U7). V ostatních případech byly odběry modelovány na hladině 110kV (U5,U3,U6,). Sít' 110kV je tvořena z 21 vedení, 26 transformátorů. Do této soustavy dále pracují zdroje: Jeden blok elektrárny s přípojnící U4 a elektrárna s přípojnící U2.

5.2 Schéma modelované oblasti



Obr.5.1 Schéma modelované oblasti

5.3 Postup určení ztrát elektrické energie:

Zjištění velikosti ztrát v modelované síti a rozdělení ztrát podle jednotlivých zatížení el.soustavy (transformátory, vedení).

První částí simulace v programu bizon projektant na modelované oblasti bylo přepínání odboček transformátoru v napájecí rozvodně U1. Sledovalo se napětí pro každou odbočku na tomto uzlu a na uzlech elektricky blízkých. Při čemž nás zajímalo jak se mění ztráty ve všech simulacích, aby bylo možné určit ve které oblasti odboček jsou ztráty minimální, a nebyla překročena toleranční mez pro jmenovitou hladinu napětí. Naměřené hodnoty se vynesly z Bizonu do programu Excel a jejich zpracováním se provedlo se vyhodnocení ve formě grafů.

Ve druhé části byl postup zpracování hodnot totožný, s tím rozdílem, že se neměnilo přímo napětí, ale prostředkem k regulaci ztrát byl generátor připojený přes transformátor k přípojnici U2. Buzením generátoru se změnila dodávka jalového výkonu při neměnném činném výkonu.

Pro obě varianty simulace se také zjišťovalo, jak ovlivňuje ztráty elektrárna připojená na přípojnici U4 dodávající výkon do dané elektrizační soustavy (simulace s připojenou a nebo odpojenou elektrárnou).

5.4 Možnosti optimalizace ztrát

5.4.1 Hlavním cílem regulace U a Q je:

Snížení technických ztrát v provozované soustavě – Procházejícím výkonem přes jednotlivé prvky přenosové a distribuční soustavy vznikají ztráty. A jelikož je přenášený výkon přímo úměrný napěťovým hladinám, lze výkon přenášený mezi jednotlivými prvky(transformátory, vedení) regulovat rozložením napětí v elektrizační soustavě.

Při čemž musíme dodržet kvalitu dodávky. U napětí to představuje dodržení tolerancí hodnoty, která by neměla přesáhnout určitou mez.

Jak bylo popsáno v kapitole 4 je vazba mezi jalovým výkonem a napětím, které mají lokální charakter a na rozdíl od frekvence, která musí být v celé soustavě stejná, se může napětí v různých místech elektrizační soustavy lišit.

Ztráty v dané elektrizační soustavě je tedy možné řídit změnou napětí několika způsoby:

- Přepínáním odboček transformátoru
- Změnou dodávky jalového výkonu

1. Přepínáním odboček transformátorů se změní rozdělení jalových výkonů v síti a dojde ke změně napětí. Změnou napětí v příslušné části elektrizační soustavy dojde ke změně napětí v tomto uzlu a v uzlech elektricky blízkých.
2. Dodávku jalového výkonu můžeme měnit u výrobních generátorů změnou jejich buzení. Kompenzace jalové složky výkonu, patří k důležitým opatřením ke snížení ztrát v rozvodu elektrické energie.

Pro variantu přepínání odboček se regulovalo napětí v rozvodně U1, 220/110kV přepínáním odboček na transformátoru a vyhodnocovaly se ztráty, které v síti vznikly. Dále se sledovaly hodnoty napětí v daných uzlech.

Poměr ztrát a napětí:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (5.1)$$

Tento vzorec se uvádí pro znázornění snížení ztrát přechodem na vyšší hladinu napětí, ale úvahu snížení ztrát zvýšením napětí lze využít pro řízení napětí na transformátorem.

např.

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{110}{120} \right)^2 = 0,84 \quad ; \quad \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{110}{100} \right)^2 = 1,21$$

A odtud je zřejmé, že při stejném zatížení a $\cos \phi$ jsou ztráty v prvním případě pro U_1 120kV menší než pro U_1 100kV.

Analýza ztrát změnou jalového toku v síti se prováděla buzením synchronního generátoru elektrárny připojeného přes transformátor k přípojnici U2 na němž se měnil jalový výkon dodávající do sítě při neměnném činném výkonu.

5.4.2 Provozní kritéria pro Q a U

1. Snížení ztrát dopravou elektřiny
2. Napětí v uzlech musí být držena uvnitř povoleného rozsahu $110 \pm 10\%$
3. Jalové výkony zdrojů jalového výkonu pro regulaci nesmí překročit dovolený regulační rozsah, který je dán provozním P-Q diagramem.

6 Vyhodnocení optimalizací

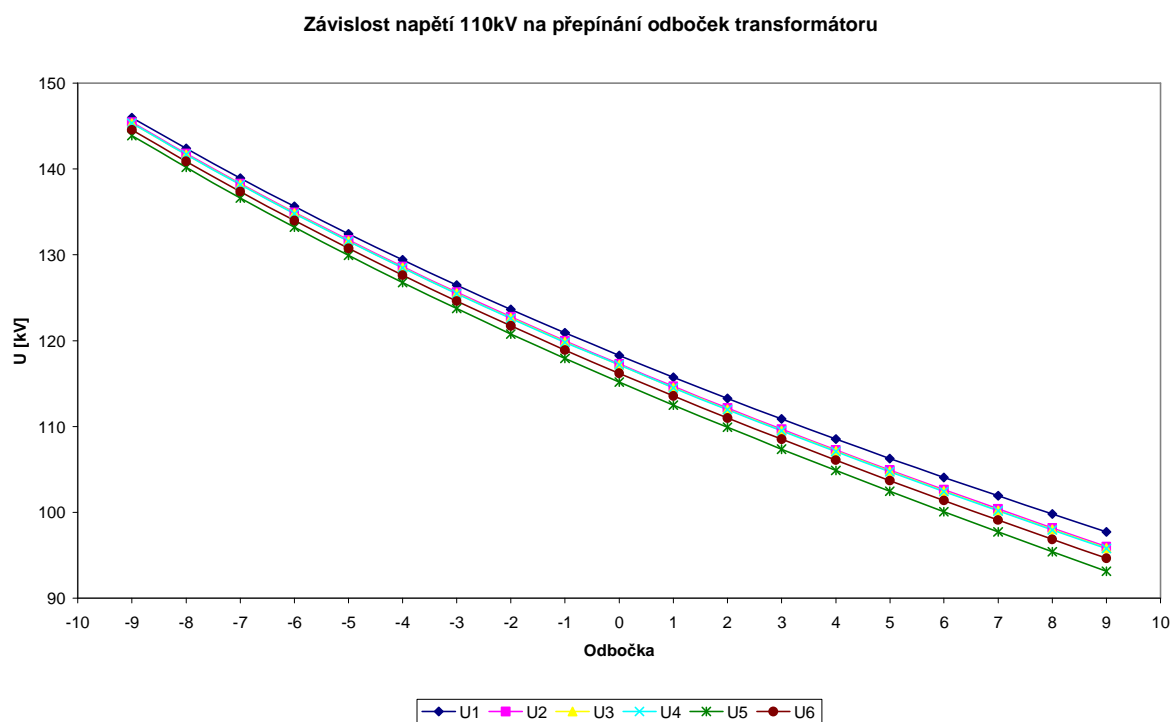
6.1 Modelované varianty modelu

6.1.1 Přepínání odboček transformátoru

Pro variantu přepínání odboček se regulovalo napětí v rozvodně U1, 220/110kV přepínáním odboček transformátoru a vyhodnocovaly se ztráty, které v síti vznikly. Dále se sledovaly hodnoty napětí v daných uzlech.

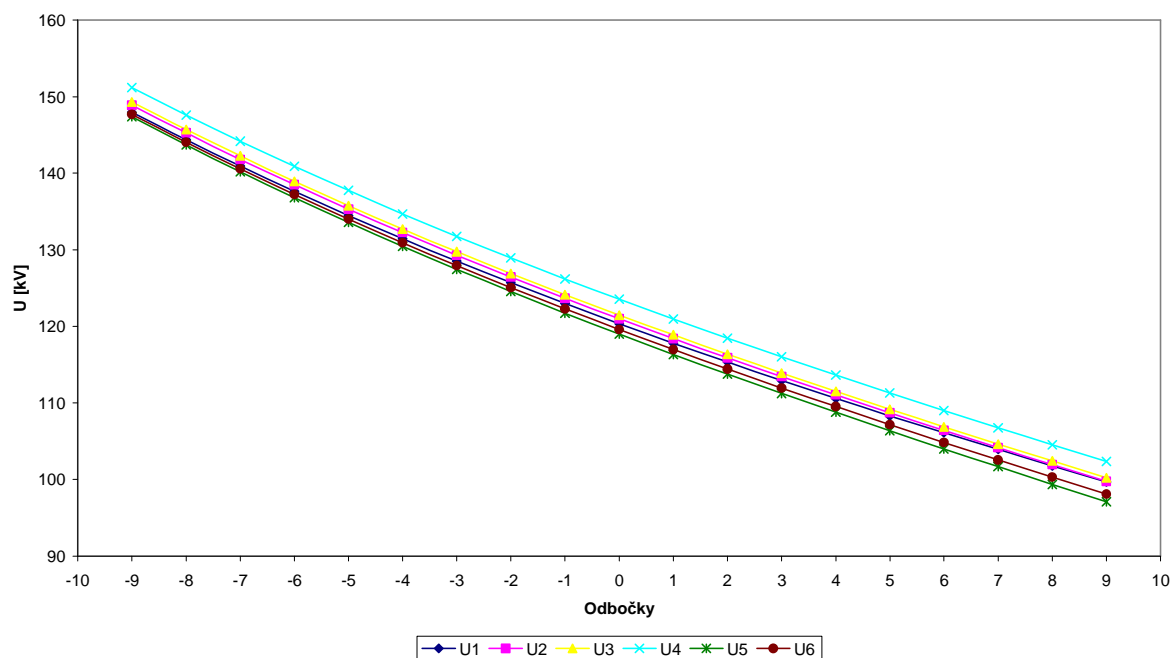
Popis grafů je společný vždy pro dvě stejné závislosti s připojenou a odpojenou elektrárnou U4.

Bez připojené elektrárny U4



S připojenou elektrárnou U4

Závislost napětí 110kV na přepínání odboček transformátoru



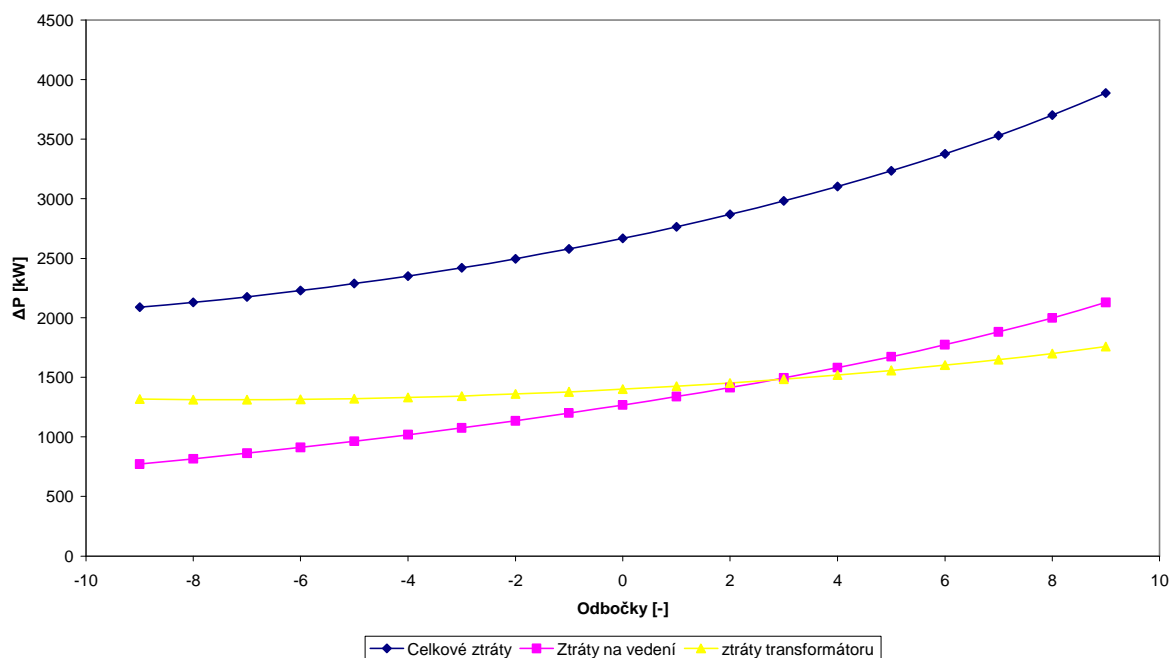
V grafech je vynesena závislost napětí na přepínání odboček transformátoru.

Z uvedených grafů vyplývá, že závislost je téměř lineární, což s shoduje s teoretickým poznatkem.

Hodnota napětí na odbočce nula je jmenovitá hodnota, která se můžeme regulovat přepínáním odboček až na požadovanou hodnotu. V síti se jmenovitým napětí 110kV je dovolená změna napětí v rozmezí $\pm 10\%$. S připojením elektrárny U4 je napětí vyšší než bez ní, obzvláště na přípojnici této elektrárny se napětí liší od ostatních.

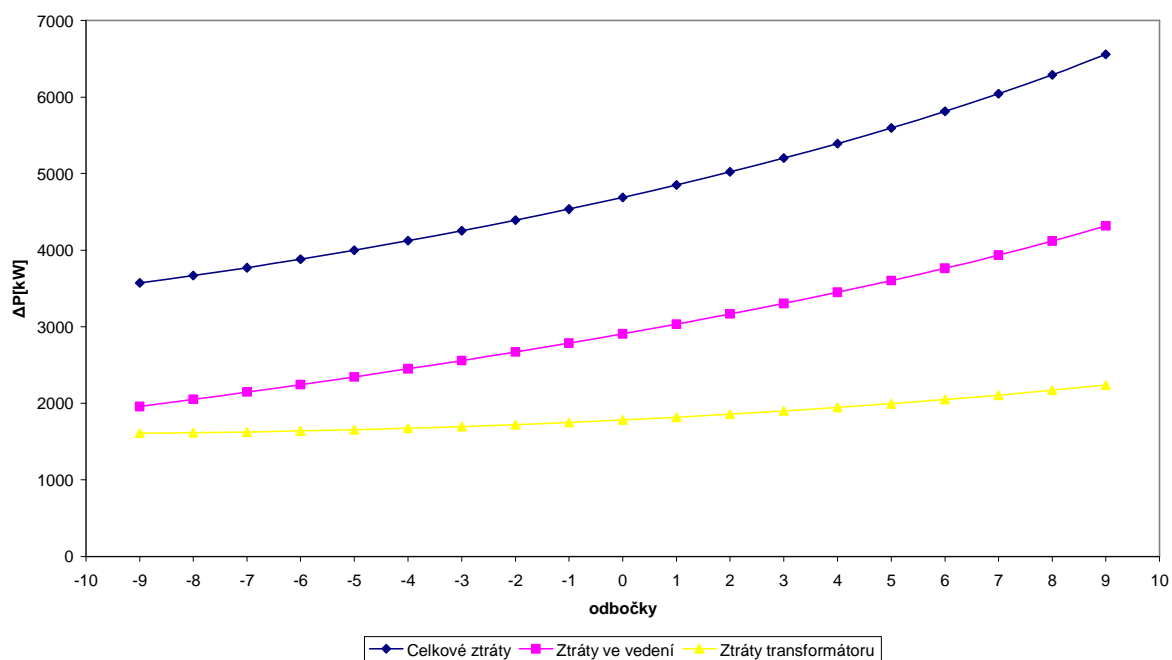
Bez připojené elektrárny U4

Závislost činných ztrát na přepínání odboček transformátoru

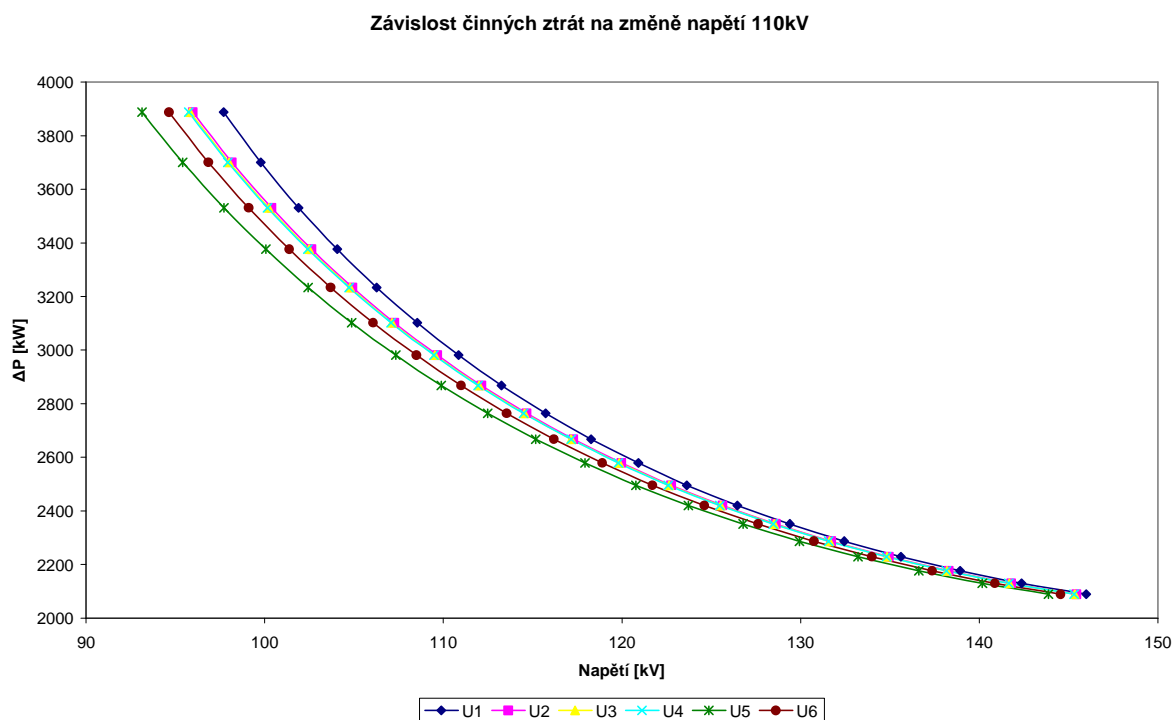
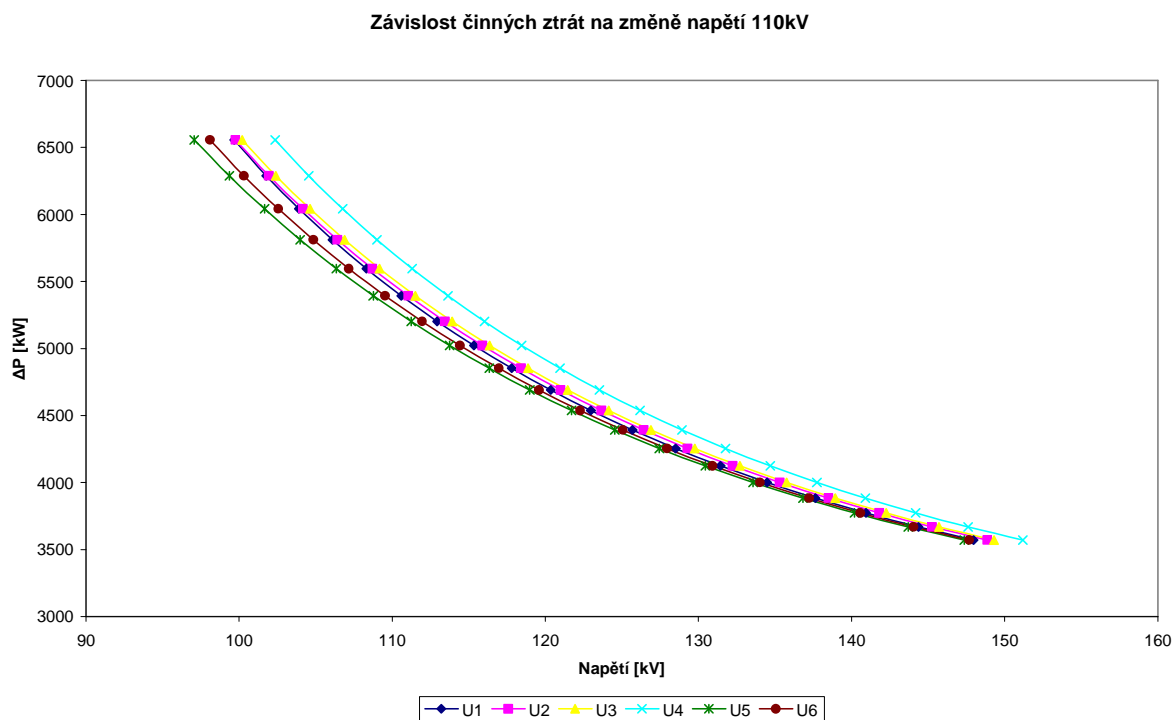


S připojenou elektrárnou U4

Závislost činných ztrát na přepínání odboček transformátoru



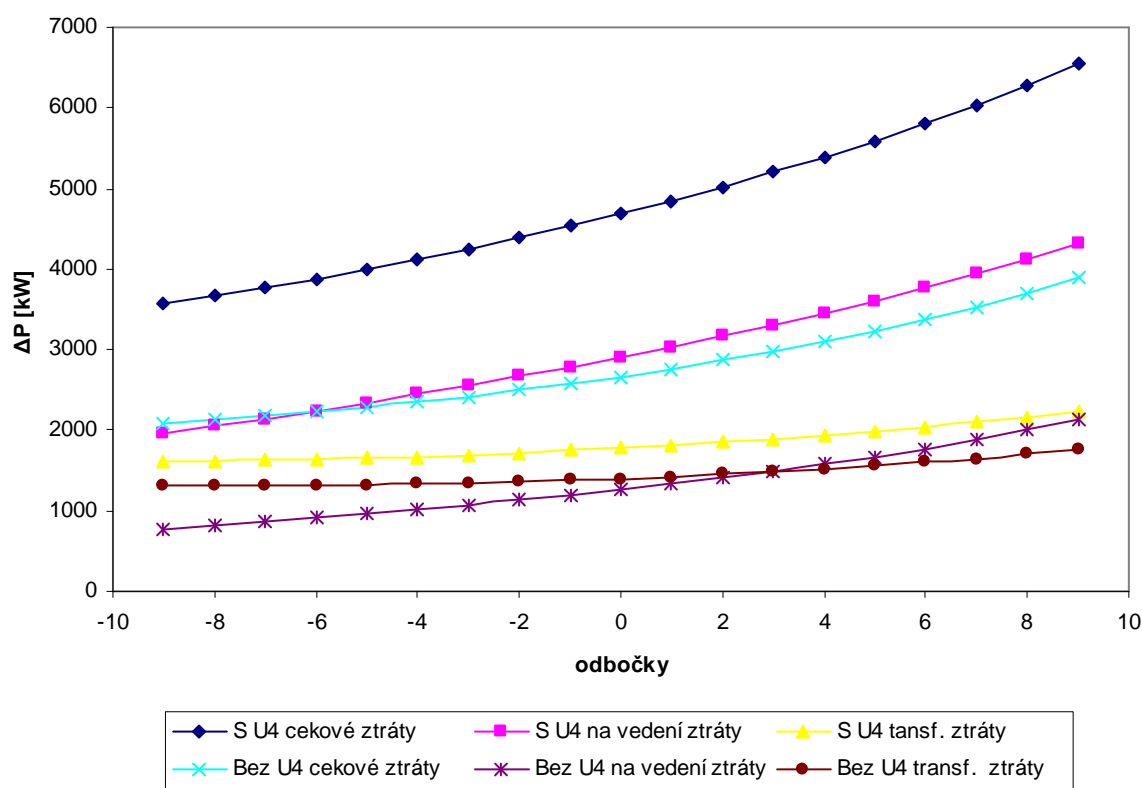
Srovnáním obou grafů je zřejmé jak ztráty ovlivňuje připojená elektrárna U4. S připojením této elektrárny jsou ztráty téměř dvojnásobkem ztrát než s elektrárnou odpojenou. Hlavní podíl na tomto jevu má vedení, jak vyplývá z grafu. Připojením elektrárny dojde k přerozdělení toku výkonů v síti, což má za následek vyšší ztráty. Minimálních ztrát se dosáhne s rostoucím napětím, což je zřejmé z vynesných grafů a zároveň se shoduje s teoretickým rozbohem.

Bez připojené elektrárny U4**S připojenou elektrárnou U4**

Z grafů je patrná závislost změny ztrát na přepínání odboček transformátoru nebo-li změně napětí. Pokud budeme napětí regulovat snižováním stupňů na výstupu z transformátoru (od 1 až 9) bude napětí na výstupu transformátoru klesat a naopak ztráty budou mít rostoucí průběh. Jestli že budeme snižovat stupně na vstupu transformátoru (-1 až -9), tak se zvyšujícím napětím ztráty klesají. Naměřené průběhy hodnot ze simulace odpovídají

Pro srovnání - změna ztrát v obou sledovaných dějích

Zmázornění ztrát s a bez připojené elektrárny U4

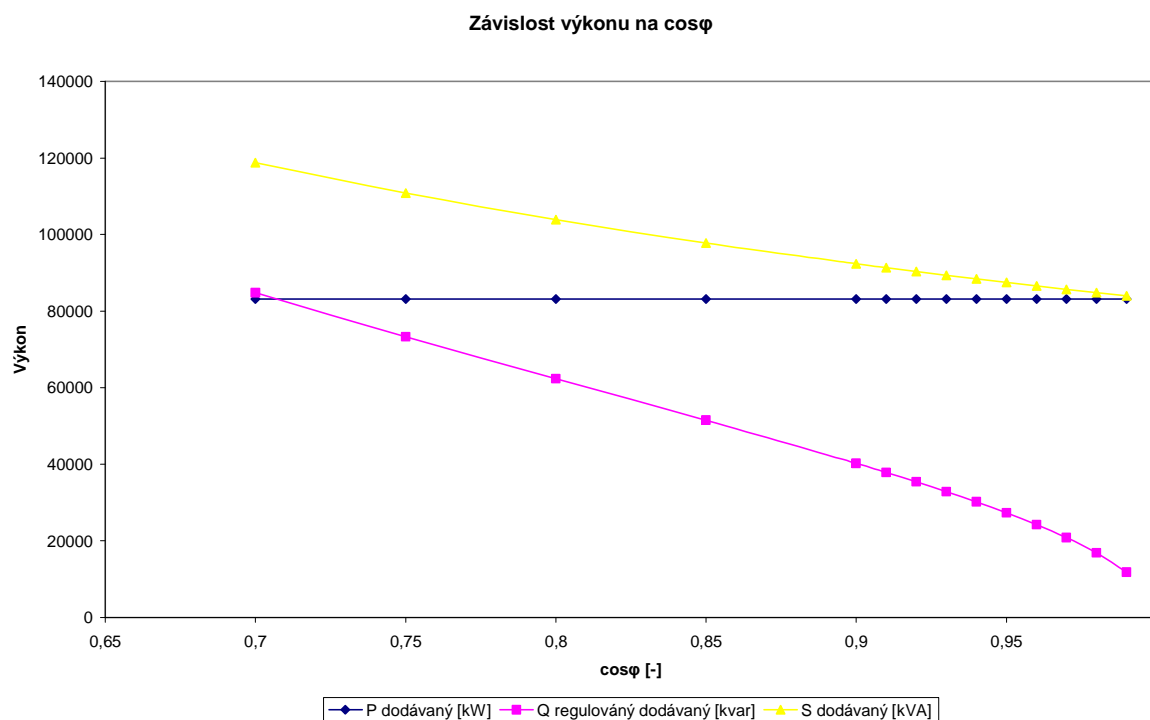


V této simulaci jsme otestovali všechny odbočky transformátoru. Ve skutečnosti je možno měnit odbočky přibližně v 10% od jmenovitého napětí, aby nebyla překročena toleranční mez daná pro jmenovitou hladinu napětí 110kV.

6.1.2 Simulace změny jalového toku buzením generátoru

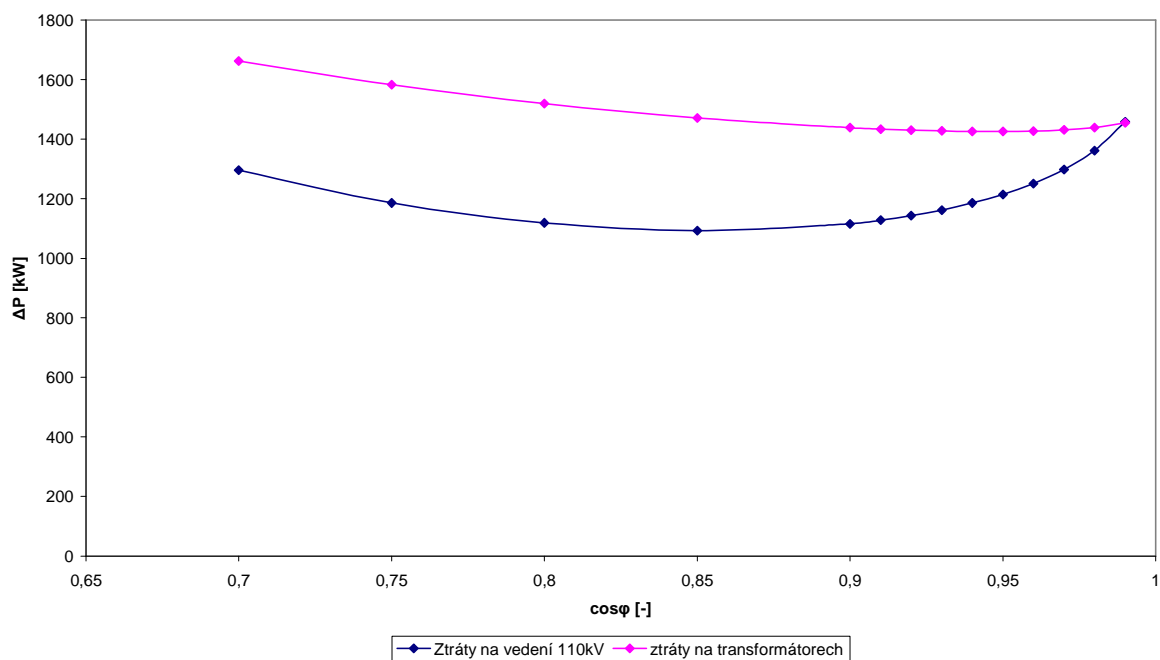
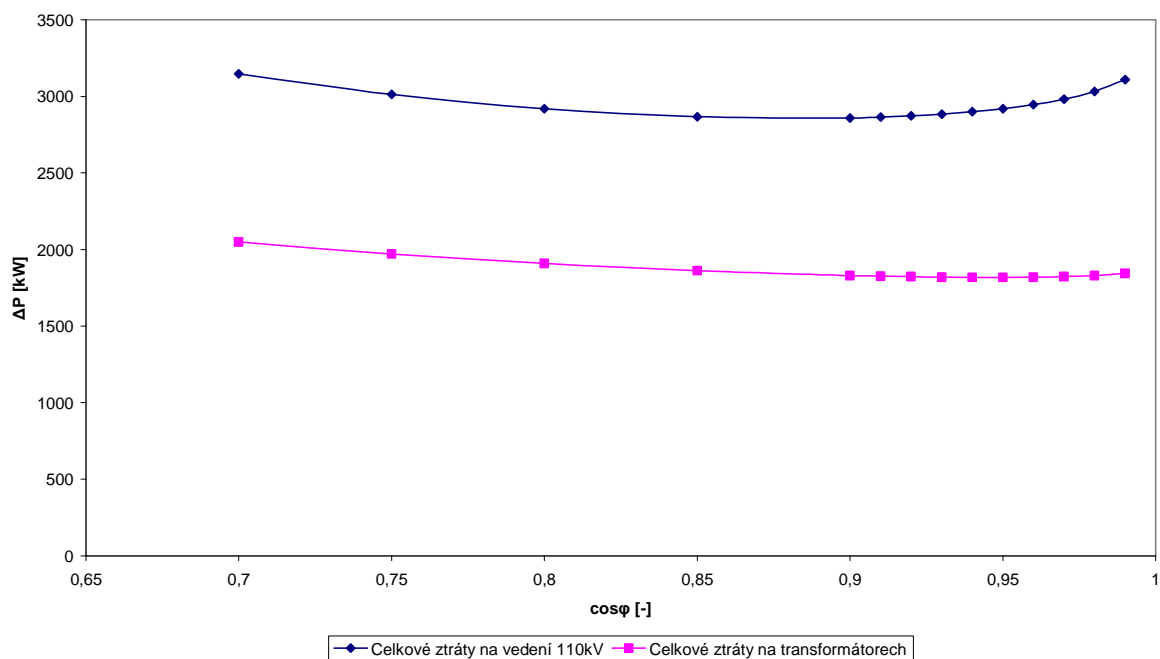
V grafech jsou vyneseny závislosti ztrát na účinníku, který udává jak velkou část zdánlivého výkonu lze převést na užitečnou energii.

Graf: Výkony generátoru připojeného přes transformátor k přípojnici U2



Z grafu je patrné jak se mění zatížení zdánlivým výkonem, jestli že měníme jalový výkon buzením generátoru elektrárny.

Provoz se špatným účinníkem zatěžuje generátory, transformátory a vedení zdánlivým výkonem, což by vyžadovalo jejich konstrukce ve větších rozměrech s větší hmotností. Další nevýhodou je menší využití, jelikož soustavou prochází zdánlivý proud, který je větší než činný, konající užitečnou práci. A jelikož činné ztráty ovlivňuje i jalová složka jsou s klesajícím účinníkem a rostoucím jalovým výkonem větší i tepelné ztráty.

Bez připojené elektrárny U4**Celkové ztráty s odpojenou elektrárnou U4****S připojenou elektrárnou U4****Celkové ztráty s připojenou elektrárnou U4**

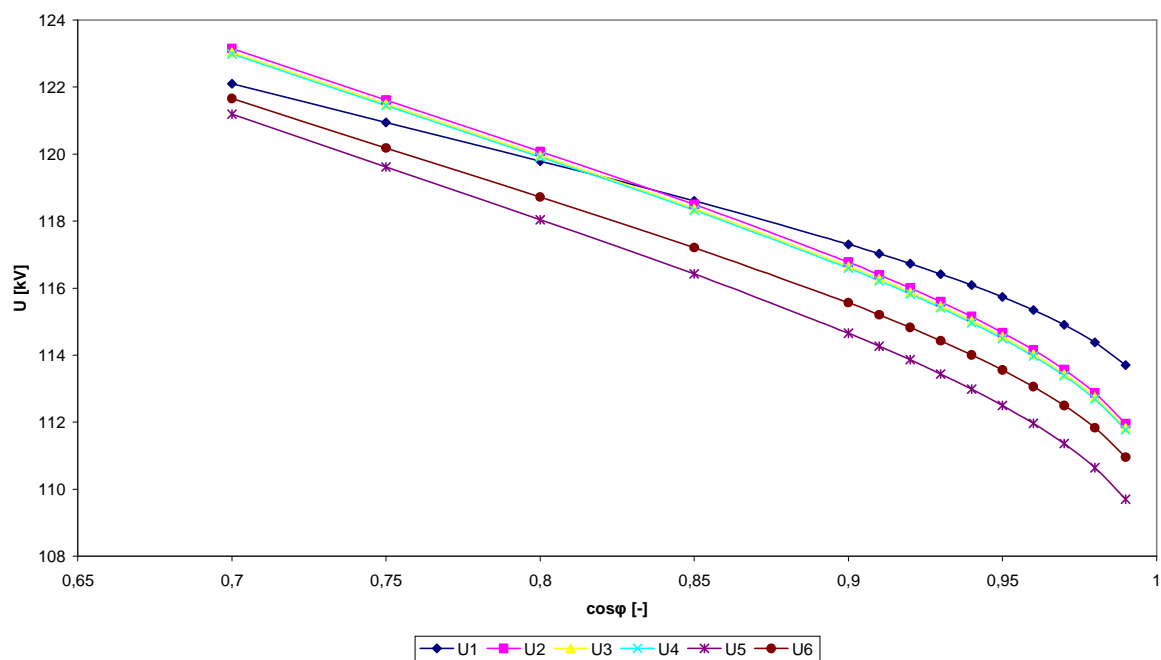
Pro provoz elektrické sítě s připojenou elektrárnou jsou ztráty minimálními ve vedení v oblasti $\cos\varphi=0,9$ a pro transformátory $\cos\varphi=0,95$. Jak je znázorněno v grafu, ztráty nemají po celou dobu zvyšování účinníku (jdoucího k jedné) klesající průběh, ale od minimální hodnoty ztrát se zvyšují.

Hodnota celkových ztrát s připojenou elektrárnou U4 je téměř dvojnásobkem hodnoty ztrát zjištěné v soustavě bez připojení této elektrárny. Změnily se i průběhy ztrát ve vedení a transformátorů. Připojená elektrárna začne dodávat elektrický výkon, dojde k přerozdělení toku výkonu, následkem toho děje je zvýšení ztrát v síti a to především ve vedení, které jsou téměř dvojnásobkem ztrát oproti provozu s odpojenou elektrárnou.

Celkové ztráty bez připojené elektrárny ve vedení jsou minimální okolo hodnoty účinníku $\cos\varphi=0,85$. Jinak tomu je u transformátorů, u kterých jsou celkové ztráty minimální kolem účinníku $\cos\varphi=0,95$.

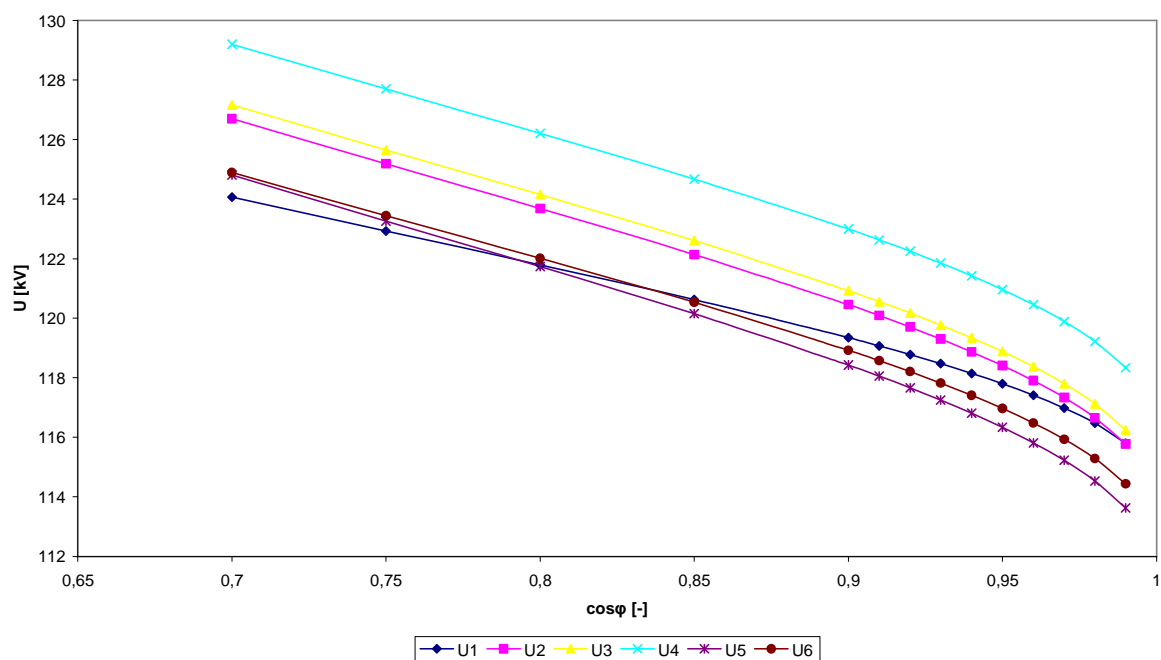
S odpojenou elektrárnou U4

Závislost napětí 110kV na změně jalového výkonu s odpojenou elektrárnou U4



S připojenou elektrárnou U4

Závislost napětí 110kV na změně jalového výkonu s připojenou elektrárnou U4



Z grafu je patrné, že napětí se blíží k jmenovité hodnotě s účínkem rostoucím k jedné. Ovšem nesmíme opomenout, že to samé neplatí pro ztráty, které určitou dobu klesají se zvyšováním účínku, ale poté se jejich hodnota zvyšuje. Napětí s připojenou elektrárnou vzroste oproti provozu s odpojenou elektrárnou, je to především znát na její přípojnici, kde napětí nejvíce odskočilo od ostatních průběhů. Napětí na přípojnici U1 nemá stejný průběh jako ostatní napětí, jelikož se jedná o pevný uzel.

Závěr

Cílem práce bylo provést rozbor elektrických ztrát u vedení přenosové soustavy a zpracovat výsledky a poznatky ze simulace v programu bizon projektant. V práci je uvedeno rozdělení technických ztrát na jednotlivé elektrické ztráty, jejich rozbor doplněný o metody výpočtů k jejich učení. Uvedené vztahy vyplývají z matematických odvození a fyzikálních zákonitostí uvedených v odborných literaturách. Dále byla provedena simulace v programu bizon projektant na namodelované síti v nejmenované severozápadní oblasti ČR, ve které se vyhodnocovaly ztráty ze získaných hodnot pro různé varianty simulace. Na základě dosažených výsledků ze simulace je možno navrhnout minimalizaci ztrát pro provoz uvedené elektrizační soustavy.

Přepínáním odboček transformátoru na přípojnici U1 byly v simulaci otestovány všechny stupně odboček a jak je patrné z grafů (nebo tabulek v příloze), je možné přepínat odbočky v rozmezí -1 až 8 stupňů pro provoz sítě s odpojenou elektrárnou U4 a v rozmezí 0 až 9 s připojenou elektrárnou, což odpovídá toleranci pro $110\text{kV} \pm 10\%$ procent jmenovitého napětí. Nejnižších ztrát bylo dosaženo s nejvyšším napětím, se kterým ztráty klesly téměř o polovinu hodnoty oproti hodnotě ztrát naměřené s nejnižším napětím. Podle teoretických poznatků se ze ztráty mění s napětím. Avšak oblast ve které můžeme ztráty optimalizovat je menší, neboť musíme dodržet toleranční mez pro jmenovitou hladinu napětí.

Změnou buzení generátoru se měnil jalový výkon dodávající do sítě při neměnném činném výkonu a sledovalo se jak se mění ztráty a napětí se změnou buzení.

V grafech jsou vyneseny závislosti ztrát na účinníku, který udává jak velkou část zdánlivého výkonu lze převést na užitečnou energii. V této simulaci se zjišťovalo v jaké oblasti regulace jalového výkonu je provoz sítě s minimálními ztrátami. Minimum ztrát se pro síť s připojenou elektrárnou s rostoucím účinníkem nachází pro vedení kolem účinníku $\cos\varphi 0,9$ a pro transformátory kolem $\cos\varphi 0,95$. Pro síť provozovanou s odpojenou elektrárnou je optimum ztrát ve vedení v oblasti účinníku $\cos\varphi 0,85$ a pro transformátory $\cos\varphi 0,95$. Od uvedených hodnot ztráty s účinníkem jdoucím k jedné a snižujícím se napětím narůstaly.

Nemalý vliv na provoz sítě měla připojená elektrárna (U4). S jejím připojením se razantně zvýšily ztráty téměř na dvojnásobek, jak u regulace napětí přepínáním odboček tak i u varianty změny jalového výkonu buzením generátoru. Důvodem zvýšení ztrát je přerozdělování toku v síti, jelikož připojená elektrárna začala dodávat do sítě velký výkon, který tento tok ovlivnil.

Závěrem lze říci, že ztráty vznikají na všech prvcích elektrizační soustavy a nejde je zcela eliminovat, ale můžeme je omezit. Problematika elektrických ztrát má tedy pro provozování elektrické soustavy značný význam.

Seznam použité literatury

- [1] KUČERA, D. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Brno: VUT, 1989. 198 s. ISBN 80-214-0056-0.
- [2] HRADÍLEK, Z. *Elektroenergetika*. Ostrava: VŠB-TU, 1992. 120s.
- [3] HODINKA, M. – FECKO, Š. – NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00065-3.
- [4] GURECKÝ, J. *Skripta z předmětu: Přenos a rozvod elektrické energie*.
- [5] MACH, V. *Skripta z předmětu: Technika vysokého napětí*
- [6] SANTARIUS, P. *Elektrické stanice a vedení*. Ostrava: VŠB-TU, 1990.
- [7] MRAVENEC, R. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: SNTL, 1979.
- [8] GURECKÝ, J. *Skripta z předmětu: Přenos a rozvod elektrické energie*
- [9] TAUŠ J. *Bakalářská práce: Vliv hodnot napětí v uzlech přenosové soustavy na ztráty v přenosu elektrické energie*
- [10] *Určení účinnosti užití energie při přenosu*
http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/clanky/en_2004_03_1.html
- [11] *Kompenzace jalové složky*
http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzaci.html

Příloha

Simulace pro přepínání odboček transformátoru

Výkonová bilance bez připojené elektrárny U4				Napětí na regulovaném transformátoru v rozvodně U1
	Ztráty činného výkonu v [kW]			
Odbočky	Celkové	Vedení	Transformátory	[kV]
-9	2089	771,754	1317,401	145,984
-8	2130	816,548	1313,46	142,378
-7	2176	863,485	1313,09	138,927
-6	2229	912,707	1316,118	135,62
-5	2287	964,386	1322,439	132,447
-4	2351	1018,701	1331,94	129,399
-3	2420	1075,869	1344,564	126,466
-2	2496	1136,125	1360,274	123,64
-1	2579	1199,747	1379,047	120,915
0	2668	1267,055	1400,91	118,281
1	2764	1338,412	1425,904	115,734
2	2868	1414,254	1454,11	113,266
3	2981	1495,08	1485,655	110,871
4	3102	1581,491	1520,688	108,543
5	3234	1674,204	1559,429	106,277
6	3376	1774,087	1602,156	104,067
7	3531	1882,192	1649,224	101,906
8	3701	1999,872	1701,104	99,7892
9	3887	2128,779	1758,379	97,7099

Výkonová bilance s připojenou elektrárnou U4				Napětí na regulovaném transformátoru v rozvodně U1
	Ztráty činného výkonu [kW]			
Odbočky	Celkové	Vedení	transformátory	
-9	3571	1959,091	1611,656	147,962
-8	3668	2051,262	1617,036	144,372
-7	3772	2146,266	1626,075	140,937
-6	3883	2244,263	1638,612	137,644
-5	4000	2345,438	1654,536	134,484
-4	4124	2450,006	1673,732	131,445
-3	4254	2558,214	1696,15	128,521
-2	4392	2670,35	1721,756	125,701
-1	4537	2786,747	1750,537	122,979
0	4690	2907,786	1782,523	120,348
1	4852	3033,92	1817,767	117,8
2	5022	3165,673	1856,362	115,329
3	5202	3303,672	1898,449	112,929
4	5393	3448,657	1944,195	110,594
5	5595	3601,516	1993,843	108,317
6	5811	3763,332	2047,696	106,094
7	6042	3935,419	2106,144	103,916
8	6289	4119,427	2169,694	101,779
9	6557	4317,536	2239,027	99,6749

Simulace pro změnu jalového výkonu buzením generátoru

výkony generátoru U2			
cos φ	P[kW]	Q[kvar]	S[VA]
0,99	83125	11844,67	83964,65
0,98	83125	16879,25	84821,43
0,97	83125	20833,09	85695,88
0,96	83125	24244,79	86588,54
0,95	83125	27321,87	87500
0,94	83125	30170,35	88430,85
0,93	83125	32853,1	89381,72
0,92	83125	35411,1	90353,26
0,91	83125	37872,87	91346,15
0,9	83125	40259,27	92361,11
0,85	83125	51516,25	97794,12
0,8	83125	62343,75	103906,3
0,75	83125	73309,36	110833,3
0,7	83125	84804,46	118750

cosφ	ztráty s U4 [kW]							Napětí na transformátoru v rozvodně U1
	ztráty v síti 110 kV		U2		U1	U7 22kV		
[-]	vedení	transformátory	Tr 1	Tr 2	Tr U1	Tr U5	zt odry	[kV]
0,99	3109,953	1844,085	283,911	283,911	78,6714	162,169	120,93	115,804
0,98	3031,856	1829,951	284,107	284,107	73,2018	160,237	118,7706	116,473
0,97	2981,785	1822,752	285,4	285,4	70,0977	158,808	117,1558	116,984
0,96	2945,993	1819,113	287,271	287,271	68,2038	157,631	115,8179	117,417
0,95	2919,266	1817,767	289,53	289,53	67,0845	156,611	114,6525	117,8
0,94	2898,996	1818,081	292,081	292,081	66,5223	155,7	113,6065	118,15
0,93	2883,662	1819,691	294,874	294,874	66,3912	154,87	112,6486	118,474
0,92	2872,298	1822,875	297,875	297,875	66,612	154,102	111,7587	118,78
0,91	2864,254	1825,96	301,067	301,067	67,1316	153,385	110,9224	119,07
0,9	2859,069	1830,36	304,435	304,435	67,9128	152,707	110,1312	119,348
0,85	2866,824	1862,492	323,731	323,731	75,0237	149,74	106,6208	120,622
0,8	2919,405	1909,408	347,12	347,12	86,6687	147,195	103,551	121,792
0,75	3012,075	1971	375,088	375,088	102,668	144,878	100,7014	122,928
0,7	3146,819	2049,076	408,544	408,544	123,457	142,689	97,954	124,072

cosφ	ztráty bez U4 [kW]							Napětí na transformátoru v rozvodně U1
	ztráty v síti 110 kV		U2		U1	U7 22kV		
[-]	vedení	transformátory	Tr 1	Tr 2	Tr U1	Tr U5	zt odry	[kV]
0,99	1458,546	1454,558	294,811	294,811	116,013	171,399	131,6536	113,695
0,98	1362,133	1439,344	294,533	294,533	105,254	169,057	128,5244	114,379
0,97	1298,409	1431,527	295,553	295,553	98,1873	167,328	126,6376	114,902
0,96	1251,293	1427,499	297,25	297,25	92,9981	165,907	125,0786	115,343
0,95	1214,69	1425,904	299,396	299,396	88,9979	164,678	123,7237	115,734
0,94	1185,536	1426,065	301,877	301,877	85,8407	164,582	122,5098	116,09
0,93	1162,048	1427,593	304,831	304,831	83,3286	162,585	121,4001	116,42
0,92	1143,093	1430,246	307,62	307,62	81,3246	161,663	120,37	116,731
0,91	1127,899	1433,858	310,819	310,819	79,7509	160,802	119,4055	117,027
0,9	1115,923	1438,318	314,212	314,212	78,5432	159,99	118,4923	117,31
0,85	1093,311	1471,176	333,833	333,833	76,7595	156,441	114,4575	118,604
0,8	1118,902	1519,351	357,797	357,797	80,513	153,405	110,9471	119,791
0,75	1186,067	1582,638	386,551	386,551	89,0811	150,648	107,703	120,942
0,7	1295,736	1662,835	421,003	421,003	102,601	148,049	104,5882	122,101